

Réponse du cotonnier (*Gossypium hirsutum* L.) à la fertilisation minérale dans diverses zones agro-écologiques : revue quantitative

Isidore Amonmidé ^(1,2), Pierre Bienvenu Irénikatché Akponikpè ^(2,3),
Gustave Dieudonné Dagbénonbakin ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Institut National des Recherches Agricoles du Bénin (INRAB). Centre de Recherches Agricoles Coton et Fibres (CRA-CF). 01 BP 175. Cotonou (République du Bénin). E-mail : amonmidé2018@yahoo.com

⁽²⁾ Université de Parakou. Faculté d'Agronomie (FA). Laboratoire d'Hydraulique et de Modélisation Environnementale (HydroModE-Lab). 03 BP 351. Parakou (République du Bénin).

⁽³⁾ Institut des Sciences et Technologies pour l'Innovation en Afrique (ISTIA). Parakou (République du Bénin).

Reçu le 29 mai 2020, accepté le 12 avril 2021, mis en ligne le 18 mai 2021.

Cet article est distribué suivant les termes et les conditions de la licence CC-BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.fr>)

Description du sujet. La réponse du cotonnier à la fertilisation minérale a été évaluée à travers une revue quantitative.

Objectifs. Il s'agissait de (i) faire une synthèse des données disponibles sur la réponse du cotonnier à la fertilisation, (ii) modéliser le rendement en fonction des niveaux de fertilisants appliqués et (iii) identifier les facteurs environnementaux qui influencent la réponse du cotonnier à la fertilisation.

Méthode. Une analyse quantitative de 71 publications scientifiques (930 traitements, témoins compris) a été effectuée afin de collecter les données de rendements en coton graine et en coton fibre à travers une recherche documentaire dans les bibliothèques scientifiques en ligne sur les pratiques de fertilisation du cotonnier suivant des critères bien définis. Un modèle linéaire à effet mixte a été utilisé avec le logiciel R.3.6.1 pour la comparaison de la réponse du cotonnier aux diverses doses de fertilisants minéraux.

Résultats. Dans 95 % des cas, cette étude a montré une réponse positive du cotonnier à la fertilisation minérale. Les doses de nutriments appliquées ont significativement affecté la réponse du cotonnier et l'efficacité agronomique de l'azote (AE-N, $p < 0,05$). Cependant, le type de sol, la pluviométrie et l'altitude n'ont pas significativement influencé la réponse du cotonnier, mais ont significativement affecté l'AE-N. La combinaison de N, P et K a enregistré les meilleurs ratios de réponse et de l'AE-N comparativement à l'application exclusive de l'azote ou sa combinaison avec le phosphore ou le potassium.

Conclusions. Cette étude suggère l'application combinée des éléments majeurs (N, P, K) à des doses modérées afin d'améliorer l'efficacité d'utilisation des nutriments en culture cotonnière. Les conditions pédoclimatiques n'ont pas significativement affecté la réponse du cotonnier, mais ont significativement influencé l'AE-N.

Mots-clés. Engrais minéraux, coton graine, ratio de réponse, efficacité agronomique des nutriments.

Response of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) to mineral fertilization in various agro-ecological zones: a quantitative review

Description of the subject. The response of cotton to mineral fertilization was assessed through a quantitative review.

Objectives. The objectives were (i) to synthesize available data on the response of cotton to fertilization practices, (ii) to model yield following applied fertilizer levels and (iii) to identify environmental factors that influence the response of cotton to fertilization practices.

Method. A quantitative analysis of 71 scientific publications (930 treatments including controls) was carried out, in order to collect seed cotton and fiber yield data through a literature search in online scientific libraries on cotton fertilization practices, following well-defined criteria. A linear mixed-effect model was fitted with R.3.6.1 software to compare the response of cotton to various mineral fertilizer doses.

Results. In 95% of cases, this study showed a positive response of cotton to mineral fertilization. The applied doses of nutrients significantly affected the response of cotton and the gain of nitrogen agronomic efficiency (AE-N, $p < 0.05$). However, the type of soil and rainfall did not significantly influence the response of cotton, but rather the AE-N. The combination of nitrogen, phosphorus and potassium showed the best response ratios and agronomic efficiency of nitrogen compared to the exclusive application of nitrogen or its combination with phosphorus or potassium.

Conclusions. This study suggests the combined application of major nutrients (N, P, K) at moderate rates to improve nutrient use efficiency in cotton crop production. Soil and climatic conditions did not significantly affect the cotton seed yield response, but significantly influenced the AE-N.

Keywords. Inorganic fertilizers, seed cotton, response ratio, agronomic nutrient use efficiency.

1. INTRODUCTION

De nombreuses études ont démontré que l'utilisation judicieuse d'engrais minéraux conduit à une augmentation des rendements (Buerkert et al., 2001 ; Traoré et al., 2007) à condition qu'aucun autre facteur de croissance, tel que l'eau et le rayonnement, ne devienne restrictif. En effet, le facteur limitant peut être également l'élément minéral qui se trouve en plus faible quantité par rapport au besoin de la plante. Au-delà de l'amélioration du rendement, l'utilisation d'engrais permet d'augmenter la biomasse aérienne et racinaire, permettant ainsi l'amélioration du taux de matière organique du sol (Bationo & Buerkert, 2001).

La nutrition minérale du cotonnier, surtout en azote, en phosphore et en potassium, est déterminante dans la production et la qualité de la fibre (Reiter et al., 2008 ; Koulibaly et al., 2010). À travers les études sur l'évolution de la fertilité des sols dans un système cotonnier-céréale au nord Cameroun, Olina-Bassala et al. (2008) ont montré la variabilité de la réponse du cotonnier à des doses croissantes de potassium et de magnésium en complément à 200 kg·ha⁻¹ de N₂₂P₁₀K₁₅S₅B₁. Ainsi, sur un sol de défriche, nouvellement mis en valeur, les compléments de 45 kg K₂O·ha⁻¹ et 7,5 kg MgO·ha⁻¹ ont entraîné une légère augmentation du rendement. Mais au-delà de ces quantités, les rendements ont régressé. Par contre, sur des parcelles de longue durée d'exploitation dont le niveau de dégradation en éléments nutritifs est très poussé, la réponse du cotonnier a été très positive avec l'application des doses croissantes de potassium et de magnésium. Ainsi, la fertilisation minérale du cotonnier doit tenir compte des conditions pédoclimatiques et du niveau de dégradation chimique, physique et biologique des sols. Au Sénégal, Guiro (2005) a montré un effet hautement significatif de la fertilisation minérale sur le rendement du cotonnier et ses composantes suite à l'application de doses croissantes (50, 100, 150 et 200 kg·ha⁻¹) du complexe N₁₄P₂₃K₁₄S₅B₁. En l'absence d'engrais, le rendement moyen était de 877 kg·ha⁻¹ de coton graine. En l'absence d'urée, les rendements étaient de 939, 1 049, 1 227 et 1 288 kg·ha⁻¹ respectivement pour 50, 100, 150 et 200 kg·ha⁻¹ de N₁₄P₂₃K₁₄S₅B₁. Avec

un complément de 50 kg·ha⁻¹ d'urée aux différentes doses, les rendements sont passés respectivement à 1 067, 1 269, 1 345 et 1 355 kg·ha⁻¹.

La réponse du cotonnier à l'application d'engrais minéral et/ou organique a été également mise en évidence au nord Bénin par Dagbénobakin et al. (2012) à travers l'étude sur les effets agronomiques du compost et du N₁₄P₂₃K₁₄S₅B₁ sur le rendement du cotonnier et ses composantes. Il ressort de cette étude que la fertilisation minérale seule a entraîné des augmentations de rendement variant de 32 à 63 % avec les doses croissantes de 50, 100, 150 et 200 kg·ha⁻¹ de N₁₄P₂₃K₁₄S₅B₁. Plus tôt, Amidou et al. (2005) avaient rapporté un gain de rendement de 250 à 350 kg·ha⁻¹ de coton graine avec 5 à 11 t·ha⁻¹ de fumier combinées à la moitié de la dose d'engrais minéraux recommandée en milieu paysan au nord Bénin.

En outre, les facteurs climatiques et édaphiques doivent être pris en compte dans les études de la réponse du cotonnier à diverses pratiques de fertilisation. Par exemple, Kalivas & Kollias (2001) ont rapporté l'effet du type de sol sur le rendement en coton graine en Grèce. De plus, les conditions extrêmes de pluviométrie affectent le rendement du cotonnier (Pettigrew, 2004 ; Baigorria et al., 2008 ; Zonta et al., 2016). En effet, Pettigrew (2004) et Zonta et al. (2016) ont rapporté que le déficit en eau au cours du cycle du cotonnier réduit le développement des feuilles, le nombre de sites fructifères, de bourgeons floraux, de capsules et le rendement final du cotonnier. Par contre, les conditions humides de six à huit semaines pendant la floraison et la maturité des capsules entraînent également la réduction des rendements en coton graine (Baigorria et al., 2008). Ainsi, la présente étude qui est une synthèse quantitative a pour objectif d'évaluer la réponse du cotonnier à différentes pratiques de gestion des nutriments dans ces différentes zones. Spécifiquement, il s'agit de :

- faire une synthèse des données disponibles sur la réponse du cotonnier à la fertilisation ;
- modéliser le rendement en fonction des niveaux de fertilisants ;
- identifier les facteurs climatiques et édaphiques qui influencent la réponse du cotonnier à la fertilisation.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Zones géographiques couvertes par la revue

Aucune restriction n'a été faite au regard de la zone géographique couverte par la présente revue quantitative. L'Afrique de l'Ouest conviendrait mieux à la zone d'étude compte tenu des similitudes du point de vue des pratiques culturales et du climat. Cependant, la documentation sur la fertilisation du cotonnier est très peu fournie dans cette zone, c'est pourquoi la revue bibliographique a été étendue au reste du monde.

2.2. Sélection des publications à inclure dans la revue

Les données collectées proviennent uniquement des publications scientifiques. La littérature « grise » constituée des mémoires d'étudiants, de thèses de doctorat et des rapports de recherche non publiés dans des journaux a été exclue afin de s'assurer de la qualité des résultats. À cet effet, les bases de données de bibliothèques en ligne comme *Google Scholar*, *Web of Sciences*, *AGORA*, etc. ont été consultées en utilisant divers mots-clés : « réponse, cotonnier, fertilisation », « cotonnier », « *Gossypium hirsutum* L. », « fertilisation minérale », « fertilisation organique », « fertilisation organo-minérale », « doses d'engrais », « réponse, cotonnier, soufre », « réponse, cotonnier, bore », etc... ou leur équivalence en anglais.

2.3. Critères généraux

Plusieurs critères ont été définis afin de retenir les publications à inclure dans la revue. Ces critères sont les suivants :

- la publication porte sur la fertilisation du cotonnier. Les doses d'engrais appliquées et leurs teneurs en unités fertilisantes ont été rapportées. L'essai comporte un témoin et les rendements en coton graine ou en coton fibre ont été présentés (Bayala et al., 2012) ;
- lorsque les essais ont été réalisés sur différents sites dans le même pays ou si les essais ont été répétés sur deux ou plusieurs années, les données ont été considérées individuellement (Geisseler & Scow, 2014) ;
- si plusieurs pratiques de fertilisation ont été étudiées dans une même étude avec un témoin, les données sont collectées suivant les pratiques.

2.4. Critères spécifiques aux pratiques de fertilisation du cotonnier

Diverses pratiques ont été recensées en matière de fertilisation du cotonnier à travers le monde. Il s'agit

de l'apport de l'azote (N), du phosphore (P_2O_5), du potassium (K_2O) en application exclusive ou en combinaison binaire ou ternaire. En plus des éléments majeurs, les éléments secondaires et les oligo-éléments tels que le bore (B), le soufre (S) et le zinc (Zn) sont souvent appliqués pour leur rôle spécifique dans la nutrition du cotonnier. Les éléments majeurs et secondaires proviennent le plus souvent des engrais minéraux et parfois des engrais organiques. Les pratiques de fertilisation recensées et le nombre de publications sont présentés en **Annexe 1**. Cependant, l'application exclusive de phosphore (3 publications), potassium (4 publications) et les combinaisons azote-potassium (3 publications), phosphore-potassium (1 publication) n'ont pas été analysées du fait d'un faible nombre de publications. Il en est de même pour la fertilisation organique ou organo-minérale (5 publications) et les variétés de coton OGM (8 publications). Au total, 89 publications ont été sélectionnées et dépouillées, puis 71 ont été traitées en se basant sur l'ensemble des critères définis (**Annexe 1**). Ces publications proviennent de 19 pays répartis sur quatre continents que sont l'Afrique, l'Europe, l'Amérique et l'Asie.

2.5. Collecte des données

Les informations collectées dans chaque publication scientifique regroupaient : l'identité de l'article, la situation géographique et les conditions climatiques de l'étude (pluviométrie), la variété de cotonnier cultivée et la durée de son cycle cultural, le type et les doses des formules d'engrais appliqués, les caractéristiques physico-chimiques du sol, les rendements en coton graine ou en coton fibre. Si une des informations relatives au type de climat du milieu d'étude, la pluviométrie ou le type de sol n'a pas été fournie par une publication, elle est complétée par des recherches bibliographiques. Ainsi, lorsque les données de précipitations n'ont pas été rapportées, les bases climatiques de la région ou de la ville la plus proche sont utilisées. La classification de Köppen Geiger (Kottek et al., 2006) a été utilisée pour le regroupement des climats des différentes zones. Trois classes de précipitation ont été définies en fonction des valeurs annuelles moyennes (P) des sites. Si une donnée d'altitude manque pour un site, les données de longitude et de latitude ont été projetées sur *Google Earth Pro* afin de déterminer l'altitude correspondante. Ainsi, les précipitations sont rangées dans la classe des précipitations faibles, lorsque $P < 700$ mm par an, dans la classe des précipitations moyennes si $700 \leq P \leq 1\,200$ mm par an et la classe des fortes précipitations regroupe les précipitations $P > 1\,200$ mm par an (Sileshi et al., 2008). Les altitudes ont été regroupées en basse,

moyenne et haute altitude, lorsque l'altitude < 700 m, $700 \leq \text{altitude} \leq 1\,200$ m et l'altitude > 1 200 m, respectivement (Sileshi et al., 2008). La classification de la FAO (IUSS Working Group WRB, 2015) a été utilisée pour la catégorisation des types de sol des sites des diverses études. Lorsque le type de sol a été rapporté dans une classification autre que celle de la FAO, son équivalence a été déterminée grâce à la littérature existante.

2.6. Calcul des paramètres de réponse du cotonnier à la fertilisation minérale

Les différences de rendements en coton graine et en coton fibre d'un traitement donné et le témoin ont été calculées par traitement et par étude. La différence de rendement (D) a été déterminée par la soustraction du rendement en coton graine ou coton fibre du témoin de l'essai du rendement du traitement considéré (Sileshi et al., 2008 ; Bayala et al., 2012). En effet, la différence de rendement est plus pertinente et facile à interpréter lorsque l'on compare les gains potentiels d'un traitement et le coût d'investissement des intrants appliqués (Sileshi et al., 2008 ; Bayala et al., 2012). Le ratio de réponse (RR) a été déterminé par le rapport du rendement du traitement concerné et le rendement de la parcelle témoin (Sileshi et al., 2008 ; Carrillo-Reche et al., 2018). L'efficacité agronomique de l'azote (AE-N) a été déterminée par le rapport du gain de rendement en coton graine d'un traitement donné rapporté à la quantité d'azote appliquée (Vanlauwe et al., 2011).

2.7. Analyse statistique des données

La différence de rendement, le ratio de réponse et l'efficacité agronomique de l'azote (AE-N) ont été analysés par les statistiques descriptives (coton graine et coton fibre) puis des modèles linéaires à effet mixte (coton graine uniquement) avec le logiciel R.3.6.1. Une transformation logarithmique a été effectuée sur le ratio de réponse avant l'introduction dans le modèle utilisé par précaution de normalité. Les autres variables (différence de rendement, AE-N) n'ont pas été soumises à cette transformation du fait de la présence de valeurs négatives. La région ayant abrité l'essai a été considérée comme facteur aléatoire et le type de climat et de sol, les classes de précipitation, d'altitude et des doses des nutriments appliquées ont été considérés comme facteurs fixes.

Une régression linéaire quadratique a été effectuée afin de modéliser la réponse du cotonnier à la fertilisation minérale. Une analyse en composantes principales a été effectuée afin d'identifier les différents facteurs influençant la réponse du cotonnier à la fertilisation minérale.

3. RÉSULTATS

3.1. Aperçu des données collectées en fonction des types de sol et de climat rencontrés

Les études ayant fourni les rendements en coton graine ont été conduites sur sept types de sol selon la classification de la FAO. Il s'agit des Cambisols, Fluvisols, Gypsisols, Lixisols, Calcisols, Ferralsols et Luvisols. Pour l'application exclusive de l'azote, 58 % des traitements proviennent des Gypsisols, tandis que pour la combinaison azote-phosphore, 35 % des traitements proviennent des Gypsisols. Pour la combinaison azote-phosphore-potassium, les Ferralsols et les Cambisols sont les plus dominants.

Par ailleurs, les études ont couvert quatre types de climat de Köppen Geiger : *Arid Desert*, *Humid Subtropical*, *Arid Steppe* et *Tropical Savanna*. La plus grande partie des études proviennent du climat de type *Humid subtropical* pour l'application exclusive de l'azote tandis que le type *Arid Desert* a enregistré le nombre de traitements le plus élevés pour la combinaison azote-phosphore. Pour la combinaison azote-phosphore-potassium, les types de climat *Tropical Savanna* et *Arid Desert* ont été les plus répandus (**Tableau 1**).

Cependant, pour le coton fibre, très peu d'études ont fourni les informations concernant les types de climat et de sol.

3.2. Variabilité de la réponse du cotonnier à différentes pratiques de fertilisation minérale

Cas du coton graine. Les résultats ont montré une réponse positive du cotonnier quelle que soit la pratique de fertilisation minérale considérée, notamment l'application exclusive de N (100 % des cas) ; les combinaisons azote-phosphore (94 % des cas) et azote-phosphore-potassium (94 % des cas) ; (**Tableau 2**). La plus grande proportion des cas a présenté des différences de rendement comprises entre 0 et 1000 kg·ha⁻¹ de coton graine (**Tableau 2**). À l'image des différences négatives de rendement, les différences de rendement supérieures à 2000 kg·ha⁻¹ de coton graine ont été rares, seulement enregistrées dans 1 et 5 % des cas pour les combinaisons azote-phosphore et azote-phosphore-potassium, respectivement. Les valeurs de D comprises entre 1000 et 2000 kg·ha⁻¹ ont été observées dans 10 %, 35 % et 15 % des cas pour N, NP et NPK, respectivement. Une plus grande variabilité de D a été observée sous la combinaison NPK (CV = 110 %) comparativement à celle de NP (CV = 80 %) et l'application exclusive d'azote (CV = 63 % ; **Tableau 2**).

Le ratio de réponse (RR) a varié de 0,93 à 6,63 avec une moyenne de $1,65 \pm 0,89$. Seulement 19 % des cas

Tableau 1. Aperçu des données pour le coton graine — *Seed cotton data overview.*

	Traitements		
	N	NP	NPK
Nombre de publications	10	8	21
Nombre de traitements (sans les témoins)	48	69	186
Sols			
Cambisols	15	24	53
Fluvisols	5	16	-
Gypsisols	28	17	22
Lixisols	-	12	39
Calcisols	-	-	4
Ferralsols	-	-	66
Luvissols	-	-	2
Climats			
<i>Arid Desert</i>	30	45	47
<i>Humid Subtropical</i>	18	-	21
<i>Arid Steppe</i>	-	24	24
<i>Tropical Savanna</i>	-	-	94

N, NP et NPK représentent les pratiques de fertilisation minérale basées sur l'application exclusive de l'azote et les combinaisons azote-phosphore et azote-phosphore-potassium, respectivement — *N, NP and NPK represent mineral fertilization practices based on the exclusive application of nitrogen, nitrogen-phosphorus and nitrogen-phosphorus-potassium combinations, respectively.*

ont présenté des $RR \geq 2$, montrant que les traitements considérés ont doublé les rendements de coton graine par rapport aux témoins. Soixante-dix-sept pourcents des cas ont présenté un RR compris entre 1 et 2, suggérant une réponse modérée du cotonnier à la fertilisation minérale. Le RR le plus élevé (6,63) a été observé sous la combinaison azote-phosphore-potassium au Togo (Kintché et al., 2015).

Cas du coton fibre. Pour le coton fibre, de fortes doses d'azote ($250 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), de phosphore ($125 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{ha}^{-1}$) et de potassium ($480 \text{ kg K}_2\text{O}\cdot\text{ha}^{-1}$) ont été appliquées soit exclusivement, soit en combinaison binaire ou ternaire. La réponse est globalement positive pour l'application exclusive de potassium, les combinaisons azote-phosphore et azote-phosphore-potassium (100 % des cas ont présenté des différences de rendement supérieures à 0, **Tableau 3**).

Les différences de rendement (D) sont en majorité comprises entre 0 et $1000 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, rarement inférieures à zéro (seulement dans 19 et 11 % des cas respectivement en cas d'application exclusive de l'azote et d'application combinée d'azote et de potassium). Dans aucun des cas, les différences de rendement n'ont été supérieures à $1000 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Les différences de rendement ont connu une grande

Tableau 2. Statistiques descriptives des différences (D) de rendements ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) en coton graine entre les parcelles fertilisées et le témoin — *Descriptive statistics of seed cotton yield differences (D, $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) between the fertilized and the control plots.*

	Traitements		
	N	NP	NPK
Nombre de publications (N)	10	8	21
Nombre de traitements	48	69	186
Minimum	87	-327	-654,70
Maximum	1 427	2 264,95	3 369,00
Moyenne	547,36	727,90	601,76
Mode	390	381	257,00
CV (%)	63	80	110
3 ^e quartile (75 %)	763	1 202,5	788,8
Médiane (50 %)	490	536,0	399,7
1 ^{er} quartile (25 %)	252,1	260,9	188
% cas avec $D < 0 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$	0	6	6
% cas avec $0 < D \leq 1000 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$	90	58	74
% cas avec $1000 < D \leq 2000 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$	10	35	15
% cas avec $D > 2000 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$	0	1	5

N, NP, NPK : voir le **tableau 1** — *see table 1.*

variabilité dans le cas de l'application exclusive de l'azote et sa combinaison avec le phosphore (CV = 121 et 87,38 %, respectivement, **Tableau 3**).

3.3. Effets de l'altitude, du climat, du sol et des précipitations sur la réponse du cotonnier à la fertilisation minérale

Pour l'ensemble des traitements, le ratio de réponse moyen a varié de 1,21 ($\pm 0,31$) à 2,31 ($\pm 1,47$) (**Tableau 4**). Aucun des facteurs considérés tels que l'altitude, le type de climat, la pluviométrie annuelle, le type de sol et le traitement appliqué n'a significativement affecté le ratio de réponse ($p > 0,05$; **Tableau 5**), indiquant ainsi une réponse similaire du cotonnier dans les différentes zones agroécologiques et traitements considérés.

3.4. Réponse du cotonnier en fonction de la dose d'azote appliquée

Le niveau d'azote appliqué a eu un effet significatif sur RR et D pour l'ensemble des traitements considérés et l'application exclusive de l'azote puis la combinaison azote-phosphore ($p < 0,05$; **Tableaux 5 et 6**).

Tableau 3. Statistiques descriptives des différences de rendements (D, kg·ha⁻¹) en coton fibre entre les parcelles fertilisées et le témoin — *Descriptive statistics of cotton fiber yield differences (D, kg·ha⁻¹) between the fertilized plots and the control.*

	Traitements				
	N	K	NP	NK	NPK
Nombre de publications (N)	9	3	4	6	4
Nombre de traitements	225	14	10	45	48
Minimum	-127,00	8,00	17,00	-46,00	120,00
Maximum	933,20	328,00	873	634,00	893,00
Moyenne	179,20	177,79	391,89	118,89	457,15
Mode	-39,00	170,00	-	25,00	-
CV (%)	121	47	87,38	106	49
3 ^e quartile (75 %)	270,0	127,5	805	158,5	635,5
Médiane (50 %)	116,0	165,00	292	104,00	415,50
1 ^{er} quartile (25 %)	23,5	255,8	95	23,5	299,8
% cas avec D < 0 kg·ha ⁻¹	19	0	0	11	0
% cas avec 0 < D ≤ 1000 kg·ha ⁻¹	81	100	100	89	100
% cas avec 1000 < D ≤ 2000 kg·ha ⁻¹	0	0	0	0	0
% cas avec D > 2000 kg·ha ⁻¹	0	0	0	0	0

N, NP, NPK : voir le **tableau 1** — *see table 1.*

Les ratios de réponse les plus élevés ont été observés avec les doses élevées d’azote et supérieures à 100 kg·ha⁻¹ en application exclusive ou combinée au phosphore (RR = 1,44 ± 0,26 et RR = 1,67 ± 0,72, respectivement ; **Annexe 2**). Les différences de rendement en coton graine les plus élevées ont été également observées sous les doses élevées d’azote (Dose N > 100 kg·ha⁻¹) lorsque cette dernière est appliquée seule (**Figure 1a**) et avec de faibles doses (Dose N < 50 kg·ha⁻¹) lorsque l’azote est combiné au phosphore (**Figure 1b**). Avec une combinaison azote-phosphore-potassium, D et RR ont été similaires pour les différents niveaux d’azote appliqués ($p > 0,05$; **Tableau 4** et **Annexe 2**).

Cependant, le climat de type *Arid Desert* et les sols de type Luvisols et Ferralsols ont enregistré les meilleures différences de rendement comparativement aux autres types ($p = 0,027$ et $p = 0,006$, respectivement) (**Tableau 5** ; **Figures 2a** et **2b**). Par ailleurs, aucun effet significatif du climat n’a été observé sur RR et D sous l’application exclusive de N et sa combinaison avec le phosphore ($p > 0,05$; **Tableaux 6** et **7**).

3.5. Effets de l’application complémentaire du bore et du soufre au NPK sur le rendement en coton graine

L’application complémentaire du bore à la fertilisation de base au NPK a significativement amélioré le rendement en coton graine par rapport au témoin ($p = 0,000$; **Tableau 8**). En effet, les doses moyennes

comprises entre 2 et 3 kg·ha⁻¹ de bore ont été les plus efficaces (**Figure 3**). Cependant, aucune différence significative n’a été observée entre les différentes classes de dose de soufre ($p = 0,106$; **Tableau 9**), contrairement aux différentes doses testées dans l’ensemble des études prises en compte ($p = 0,024$; **Tableau 9**, **Figure 4**).

Par ailleurs, la pluviométrie n’a affecté le rendement en coton graine que sous l’application de bore en complément au NPK ($p < 0,000$; **Tableau 8**).

3.6. Modèles de réponse du cotonnier à la fertilisation minérale

La régression polynomiale effectuée a montré une faible corrélation entre les rendements en coton graine et les doses de nutriments au niveau de l’application de l’azote seul ou en combinaison avec le phosphore d’une part et avec le phosphore et le potassium d’autre part (**Figures 5**, **6** et **7**). En effet, la corrélation entre le rendement en coton graine à l’apport d’azote a été relativement élevée quand ce dernier a été appliqué seul ($R^2 = 33\%$; $p = 0,000$; **Figure 5a**) ou en combinaison avec le phosphore et le potassium ($R^2 = 35\%$; $p = 0,000$; **Figure 5c**), contrairement à la combinaison au phosphore uniquement ($R^2 = 2\%$; $p = 0,327$; **Figure 5b**). La même tendance a été observée au niveau du phosphore où la corrélation entre le rendement en coton graine et la dose de P₂O₅ a été plus forte sous la combinaison azote-phosphore-potassium ($R^2 = 29\%$; $p = 0,000$; **Figure 6b**) qu’au niveau de la combinaison

Tableau 4. Réponse du cotonnier à la fertilisation minérale en fonction de l'altitude, du type de climat, du type de sol et de la précipitation annuelle pour l'ensemble des traitements considérés — *Response of the cotton to mineral fertilization by altitude, climate type, soil type and annual rainfall for all considered treatments.*

	NT	RR	sd.	CV (%)
Altitudes (m)				
Faible	258	1,69	0,93	55,03
Moyenne	45	1,39	0,55	39,60
Types de climat				
<i>Arid Desert</i>	119	1,59	0,64	40,01
<i>Arid Steppe</i>	51	1,41	0,40	28,01
<i>Humid Subtropical</i>	39	1,36	0,26	19,00
<i>Tropical Savanna</i>	94	1,97	1,34	67,88
Précipitations				
Faible	166	1,52	0,53	35,15
Moyenne	123	1,87	1,22	65,35
Élevée	14	1,28	0,17	12,99
Types de sol				
Cambisols	92	1,74	0,58	33,61
Fluvisols	141	1,29	0,37	28,90
Gypsisols	68	1,25	0,23	18,52
Lixisols	51	1,35	0,53	39,56
Luvisols	2	2,02	0,03	1,40
Ferralsols	66	2,31	1,47	63,66
Calcisols	4	1,21	0,31	25,31

NT : nombre de traitements différents du témoin — *number of treatments different from the control* ; RR : ratio de réponse — *response ratio* ; sd. : écart-type — *standard deviation* ; CV : coefficient de variation — *coefficient of variation* ; classes d'altitude — *altitude classes* : « Faible » et « Moyenne » correspondent à Altitude < 700 m et $700 \leq \text{Altitude} \leq 1\,200$ m, respectivement — «*Low*» and «*Medium*» correspond to Altitude < 700 m and $700 \leq \text{Altitude} \leq 1,200$ m, respectively ; classes de pluviométrie — *rainfall classes* : « Faible », « Moyenne » et « Élevée » correspondent à $P < 700 \text{ mm}\cdot\text{an}^{-1}$, $700 \leq P \leq 1\,200 \text{ mm}\cdot\text{an}^{-1}$ et $P > 1\,200 \text{ mm}\cdot\text{an}^{-1}$, respectivement — «*Low*», «*Medium*» and «*High*» correspond to $P < 700 \text{ mm}\cdot\text{year}^{-1}$, $700 \leq P \leq 1,200 \text{ mm}\cdot\text{year}^{-1}$ and $P > 1,200 \text{ mm}\cdot\text{an}^{-1}$ respectively;

azote-phosphore ($R^2 = 18\%$; $p = 0,000$; **Figure 6a**). Le coefficient de détermination le plus élevé dans cette étude a été observé dans le cas du potassium traduisant une corrélation relativement élevée entre le rendement en coton graine et la dose de K_2O ($R^2 = 43\%$; $p = 0,000$; **Figure 7**).

3.7. Relation entre les paramètres de réponse du cotonnier pour l'ensemble des différents traitements

Les résultats de l'analyse en composantes principales (ACP) des indicateurs de réponse, des doses de nutriments appliquées, l'altitude, la pluviométrie et les

Tableau 5. ANOVA du ratio de réponse (RR) et la différence de rendement en coton graine (D) en fonction de l'altitude, la pluviométrie, la dose d'azote appliquée et le traitement pour l'ensemble de toutes les pratiques de fertilisation minérale considérées — *ANOVA of response ratio (RR) and seed cotton yield difference (D) as affected by altitude, rainfall, applied nitrogen rate and treatment for all considered mineral fertilization practices.*

	ddl.	RR		D	
		F-value	p-value	F-value	p-value
Ordonnée	257	45,40	< 0,000	49,67	< 0,000
Classes d'altitude	257	0,15	0,700	0,10	0,751
Classes de pluviométrie	257	0,56	0,572	0,58	0,560
Classes de Dose N	257	5,22	0,006	12,07	< 0,000
Type de sol	257	1,09	0,372	1,47	0,178
Type de climat	28	0,35	0,790	2,87	0,054
Traitement	257	1,28	0,279	0,20	0,819

ddl. : degré de liberté — *degree of freedom*.

caractéristiques chimiques du sol ont montré que les deux premières composantes ont représenté 65 % de la variation totale de l'ensemble des données (**Figure 8**, **Tableau 10**). Il en ressort que le rendement en coton graine, les doses d'azote et de phosphore appliquées et le pH du sol sont positivement corrélés avec la composante 1 (rendement en coton graine) (**Tableau 10**), contrairement à la pluviométrie qui a été négativement corrélée avec cette dernière. La teneur en azote total du sol, l'altitude et le ratio de réponse ont été positivement corrélés avec la composante 2 (indicateurs de réponse du cotonnier à la fertilisation minérale) (**Tableau 10**). La dose de potassium appliquée et la teneur en carbone organique du sol sont faiblement représentées sur ces deux premières composantes considérées.

On en déduit que les rendements en coton graine élevés ont été observés sous l'application de fortes doses d'azote et de phosphore sous une faible pluviométrie, tandis que les plus forts ratios de réponse ont été obtenus sur des sols à teneur initiale en azote total élevée et situés à une altitude élevée (**Figure 8**).

3.8. Efficience agronomique de l'azote

Pour l'ensemble des traitements considérés, l'efficience agronomique de l'azote (AE-N) a varié de -19,30 à 80,03 kg·kg⁻¹ N, avec une moyenne

Tableau 6. ANOVA du ratio de réponse (RR) et la différence de rendement en coton graine (D) en fonction de l'altitude, la pluviométrie et la dose d'azote appliquée sous l'application exclusive de l'azote, la combinaison azote-phosphore et la combinaison azote-phosphore-potassium — ANOVA of response ratio (RR) and seed cotton yield difference (D) as affected by altitude, rainfall and applied nitrogen rate under the exclusive application of nitrogen, the nitrogen-phosphorus combination and the nitrogen-phosphorus-potassium combination.

	ddl.	RR		D	
		F-value	p-value	F-value	p-value
Azote					
Ordonnée	37	31,54	< 0,000	45,01	< 0,000
Classes Altitude	4	0,42	0,554	0,14	0,730
Classes Pluviométrie	4	0,19	0,689	0,20	0,680
Classes Dose N	37	25,58	< 0,000	38,31	< 0,000
Types de sol	4	2,68	0,182	3,45	0,135
Combinaison azote-phosphore					
Ordonnée	61	4,93	0,030	9,79	0,003
Classes Altitude	3	0,05	0,839	0,72	0,458
Classes Pluviométrie	3	0,53	0,518	0,17	0,706
Classes Dose N	61	7,10	0,002	6,83	0,002
Combinaison azote-phosphore-potassium					
Ordonnée	149	54,91	< 0,000	95,18	< 0,000
Classes Altitude	149	0,14	0,706	0,00	0,992
Classes Pluviométrie	149	0,32	0,729	2,70	0,071
Classes Dose N	149	0,13	0,882	1,61	0,204
Classes Dose P	17	0,10	0,904	18,77	< 0,000
Classes Dose K	149	1,89	0,154	2,24	0,110
Types de climat	17	1,30	0,308	3,88	0,027
Types de sol	149	1,58	0,144	2,98	0,006

Classes de pluviométrie, classes d'altitude — *rainfall classes, altitude classes* : voir **tableau 4** — *see table 4* ; classes de dose d'azote — *nitrogen rate classes* : « Faible », « Moyenne » et « Élevée » correspondent à dose N < 50 kg·ha⁻¹, 50 ≤ dose N ≤ 100 kg·ha⁻¹ et dose N > 100 kg·ha⁻¹, respectivement — « Low », « Medium » and « High » correspond to N dose < 50 kg·ha⁻¹, 50 ≤ N dose ≤ 100 kg·ha⁻¹ and N dose > 100 kg·ha⁻¹, respectively ; types de sol — *soil types* : Cambisols, Gypsisols, Lixisols, Luvisols, Ferralsols et Calcisols, Fluvisols, suivant la classification de la FAO — *Cambisols, Gypsisols, Lixisols, Luvisols, Ferralsols and Calcisols, Fluvisols, according to the FAO classification* ; types de climat — *climate types* : Arid Desert, Arid Steppe, Subtropical Humid et Tropical Savanna — *Arid Desert, Arid Steppe, Subtropical Humid and Tropical Savanna* ; ddl. : degré de liberté — *degree of freedom*.

de 8,57 ± 12,06 kg·kg⁻¹ N. Les efficacités les plus élevées ont été enregistrées sous les faibles doses de N pour l'application de N seul et la combinaison azote-phosphore-potassium (*p* = 0,029 et *p* = 0,010, respectivement ; **Tableau 11**). De plus, les type de sol (*p* = 0,043) et de climat (*p* = 0,038), la pluviométrie (*p* < 0,000) et la dose de potassium (*p* < 0,000) ont significativement affecté l'AE-N sous la combinaison azote-phosphore-potassium (**Tableau 11**). Les meilleures efficacités ont été observées sous le climat de type *Tropical Savanna* (**Figure 9a**), à pluviométrie moyenne (700 ≤ P ≤ 1200 mm·an⁻¹), sur les sols de type Ferralsols (**Figure 9b**) et les doses moyennes de K₂O (50 ≤ doses K₂O ≤ 100 kg·ha⁻¹) au niveau de la

combinaison azote-phosphore-potassium (**Annexe 3**). Aucun effet significatif du type de climat n'a été observé sur AE-N pour les pratiques N et NP (*p* > 0,05 ; **Tableaux 6 et 7**).

4. DISCUSSION

4.1. Réponse du cotonnier à la fertilisation minérale

Les résultats ont montré une réponse positive des différentes pratiques de fertilisation minérale sur la culture cotonnière. Ces résultats peuvent être

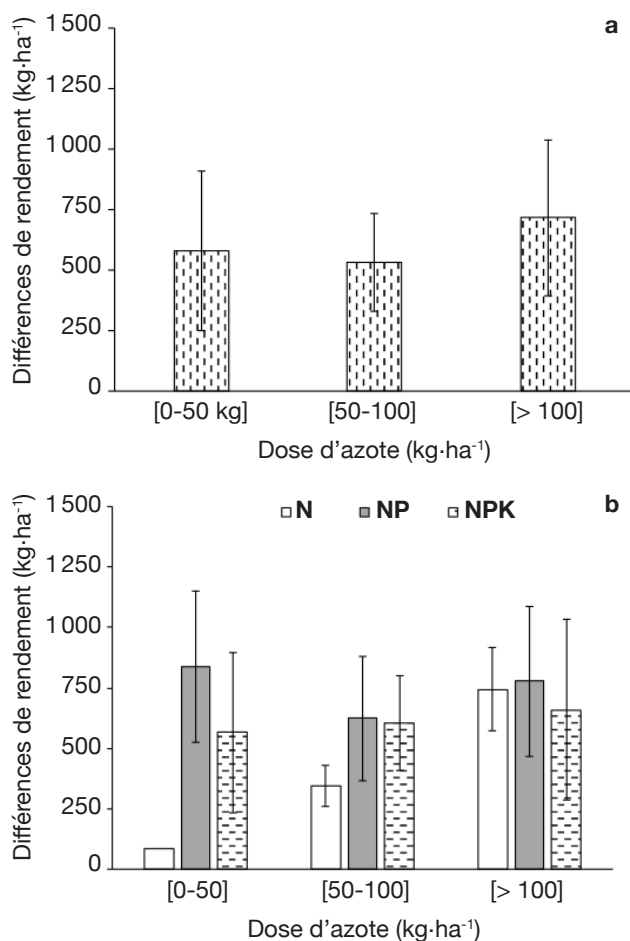


Figure 1. Différences de rendement en coton graine entre les parcelles fertilisées et le témoin suivant le niveau d'azote appliqué : **a.** application exclusive d'azote ; **b.** combinaisons azote-phosphore et azote-phosphore-potassium — *Seed cotton yield differences between the fertilized plots and the control by the level of applied nitrogen: a. exclusive nitrogen application; b. nitrogen-phosphorus and nitrogen-phosphorus-potassium combinations.*

Les barres d'erreur représentent l'écart-type — *the error bars denote the standard deviation.*

expliqués par l'insuffisance des réserves minérales ou la non-disponibilité de certains nutriments du sol pour couvrir les besoins en nutriments du cotonnier sans apport d'engrais. Selon Singh et al. (2010), malgré l'importance de la composition initiale en nutriments des sols (carbone organique, azote total, phosphore disponible, potassium assimilable, etc.) sur le rendement du coton, celle-ci n'est pas suffisante pour couvrir les besoins nutritifs du cotonnier. Ainsi, Boquet et al. (2009) ont montré que l'azote résiduel du sol issu de la fertilisation du maïs a affecté la réponse du cotonnier dans une rotation maïs-coton aux États-Unis. Hutmacher et al. (2004) ont rapporté, au terme d'une étude sur la réponse de différentes variétés de

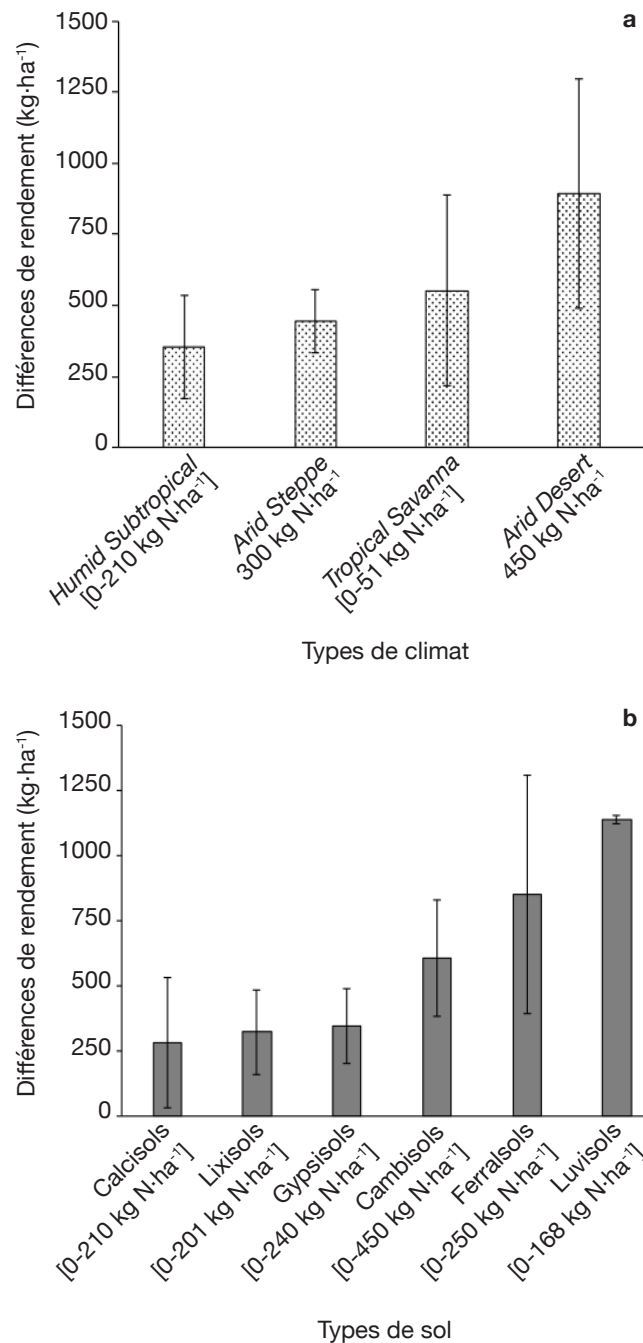


Figure 2. Différences de rendement en coton graine (D) suivant les types de climat (**a**) et de sol (**b**) — *Seed cotton yield differences (D) by climate (a) and soil types (b).*

Les barres d'erreur représentent l'écart-type — *the error bars represent the standard deviation* ; les intervalles après les types de sol et de climat représentent la variation de la dose d'azote appliquée — *the intervals after soil and climate types represent the variation in the applied nitrogen rate* ; les intervalles après les types de sol et de climat représentent la variation de la dose d'azote appliquée en kg·ha⁻¹ — *intervals after soil and climate types represent the variation in applied nitrogen rate in kg·ha⁻¹.*

Tableau 7. ANOVA du ratio de réponse (RR), la différence de rendement en coton graine (D) entre les parcelles fertilisées et le témoin et l'efficacité agronomique de l'azote (AE-N) en fonction du type de climat sous l'application exclusive d'azote — *ANOVA of response ratio (RR), seed cotton yield difference (D) between the fertilized and the control plots, and the agronomic efficiency of nitrogen (AE-N) as affected by type of climate under exclusive nitrogen application.*

	ddl.	RR		D		AE-N	
		F-value	p-value	F-value	p-value	F-value	p-value
Ordonnée	39	37,48	< 0,000	29,81	< 0,000	49,31	< 0,000
Climat	6	0,36	0,714	0,118	0,891	0,03	0,967

Climat — *climate* : Arid Desert, Arid Steppe, Subtropical Humid ; ddl. : degré de liberté — *degree of freedom.*

Tableau 8. ANOVA du rendement en coton graine en fonction des doses de bore et pluviométrie et des classes de doses de bore et de pluviométrie — *ANOVA of seed cotton yield between boron rates and rainfall and boron rate classes and rainfall classes.*

Sources	ddl.	F-value	p-value
Doses de bore et pluviométrie			
Ordonnée	45	6 185,26	< 0,000
Dose B	45	19,69	0,000
Pluviométrie	45	35,86	< 0,000
Classes de doses de bore et de pluviométrie			
Ordonnée	43	8 862,87	< 0,000
Classes Dose B	43	5,474	0,001

Classes de dose de bore : « Faible », « Moyenne » et « Élevée » correspondent à dose B ≤ 1 kg·ha⁻¹, 1 < dose B ≤ 3 kg·ha⁻¹ et dose B > 3 kg·ha⁻¹, respectivement — *Boron rate classes: «Low», «Medium» and «High» correspond to B rate ≤ 1 kg·ha⁻¹, 1 < B rate ≤ 3 kg·ha⁻¹ and B rate > 3 kg·ha⁻¹, respectively; ddl. : degré de liberté — degree of freedom.*

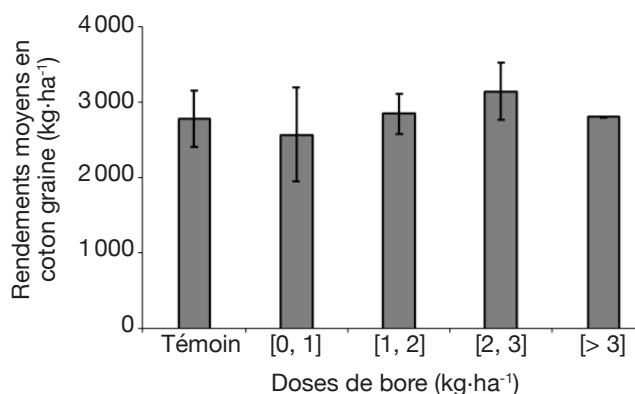


Figure 3. Rendements moyens en coton graine en fonction des niveaux de bore appliqués — *Average seed cotton yield by applied boron rates.*

Les barres d'erreur représentent l'écart-type — *the error bars represent the standard deviation.*

Tableau 9. ANOVA du rendement en coton graine en fonction de la dose de soufre et de la pluviométrie et des classes de dose de soufre et de pluviométrie — *ANOVA of seed cotton yield between sulfur rates and rainfall and sulfur rate classes and rainfall classes.*

Sources	ddl.	F-value	p-value
Dose de soufre et pluviométrie			
Ordonnée	81	2213,93	<0,000
Dose S	81	5,32	0,024
Pluviométrie	81	0,00	0,985
Classes de dose de soufre et de pluviométrie			
Ordonnée	80	2474,09	<0,000
Classes Dose S	80	2,11	0,106
Classes pluviométrie	8	0,99	0,412

Classes de dose de soufre — *sulfur rate classes* : « Faible », « Moyenne » et « Élevée » correspondent à dose S ≤ 50 kg·ha⁻¹, 50 ≤ dose S ≤ 100 kg·ha⁻¹ et dose S > 100 kg·ha⁻¹, respectivement — «Low», «Medium» and «High» correspond to S rate ≤ 50 kg·ha⁻¹, 50 < S rate ≤ 100 kg·ha⁻¹ and S rate > 100 kg·ha⁻¹, respectively ; classes de pluviométrie — *rainfall classes* : « Faible », « Moyenne » et « Élevée » correspondent à P < 700 mm·an⁻¹, 700 ≤ P ≤ 1 200 mm·an⁻¹ et P > 1 200 mm·an⁻¹ respectivement — «Low», «Medium» and «High» correspond to P < 700 mm·year⁻¹, 700 ≤ P ≤ 1,200 m·year⁻¹ and P > 1 200 mm·year⁻¹ respectively.

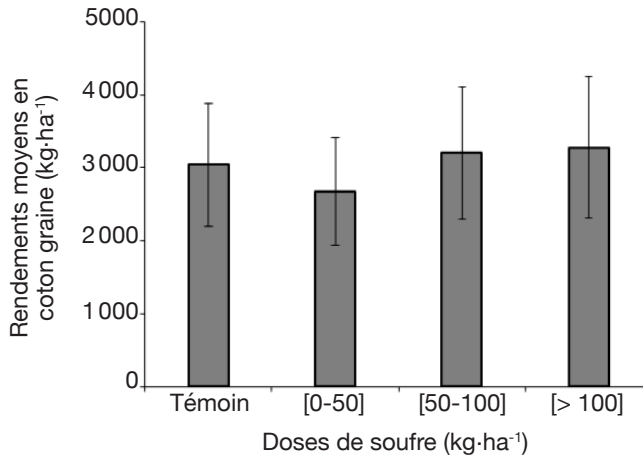


Figure 4. Rendements moyens en coton graine en fonction des niveaux de soufre appliqués — *Average seed cotton yield by applied sulfur rate.*

Les barres d'erreur représentent l'écart-type — *the error bars represent the standard deviation.*

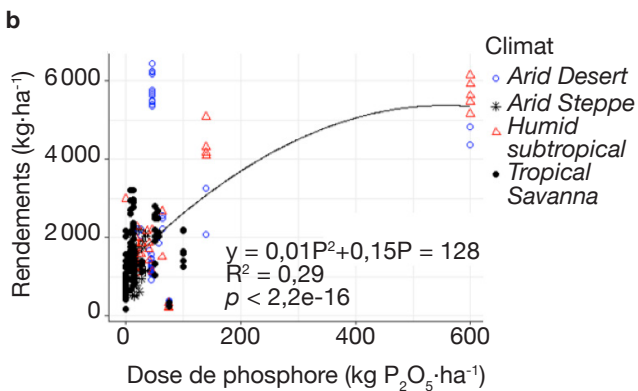
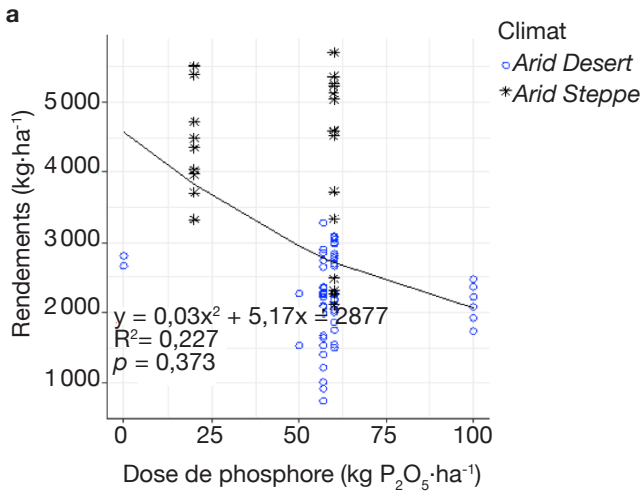


Figure 6. Réponse du cotonnier à la fertilisation phosphatée en combinaison avec l'azote (a) et avec le phosphore et le potassium (b) suivant le type de climat — *Response of cotton to phosphated fertilization in combination with nitrogen (a) and with nitrogen and potassium (b) by climate type.*

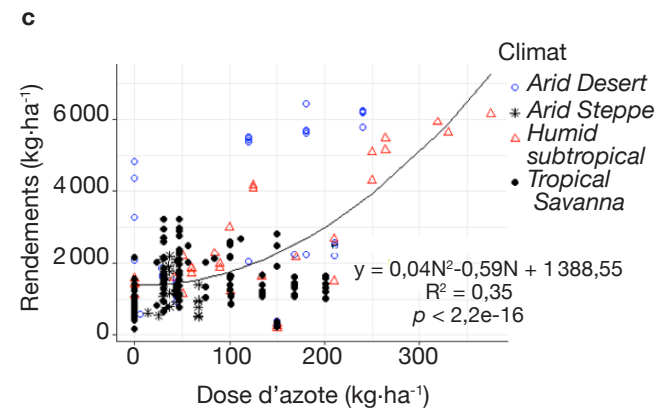
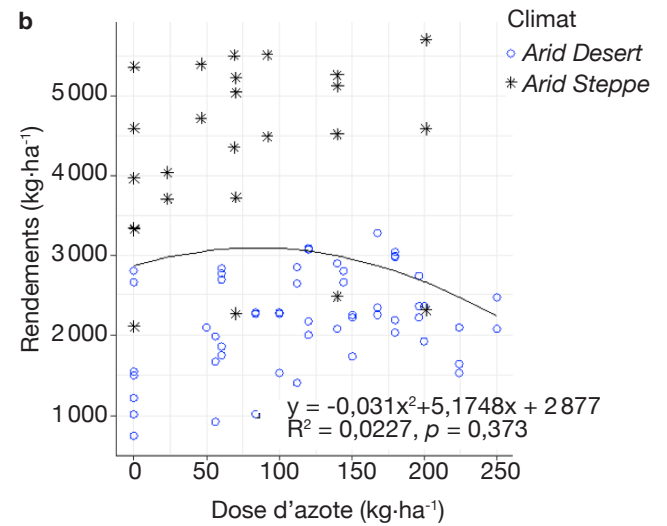
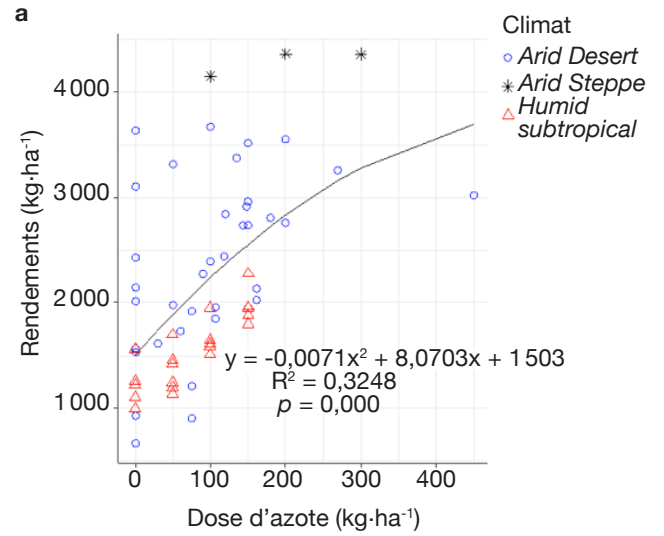


Figure 5. Réponse du cotonnier à la fertilisation azotée seule (a), en combinaison avec le phosphore (b) et avec le phosphore et le potassium (c) suivant le type de climat — *Response of cotton to sole nitrogen fertilization (a), in combination with phosphorus (b) and with phosphorus and potassium (c) by climate type.*

Tableau 10. Relation entre les composantes principales et les variables étudiées — *Relationship between the main components and the studied variables.*

Variable	Composante 1	Composante 2
Rendt	0,9275143	-
Dose_N	0,8429072	0,2565503
pH _{eau}	0,7521656	-0,5621721
Dose_P	0,6116326	0,5445482
Dose_K	0,5491503	-0,2270792
OC	0,5411889	0,6016414
Altitude	0,4344141	0,7245982
RR	-0,2929224	0,6717218
Pluviométrie	-0,7462873	0,4609669

Rendt, Dose_N, pH_{eau}, Dose_P, Dose_K, OC, Altitude, RR, Pluviométrie représentent le rendement en coton graine, la dose d’azote, le pH_{eau} du sol, la dose de phosphore, la dose de potassium, la teneur en carbone organique du sol, l’altitude du site d’étude, le ratio de réponse de coton graine et la pluviométrie annuelle, respectivement — *Yield, Dose_N, pH_{water}, Dose_P, Dose_K, OC, Altitude, RR, Rainfall stand for seed cotton yield, soil nitrogen, soil pH_{water}, soil phosphorus, soil potassium, the study site’s elevation, response ratio and annual rainfall, respectively.*

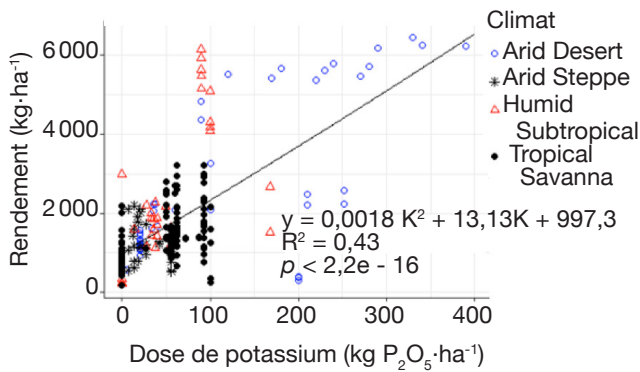


Figure 7. Réponse du cotonnier à la fertilisation potassique en combinaison avec l’azote et le phosphore suivant le type de climat — *Response of the cotton to potassium fertilization in combination with nitrogen and phosphorus by climate type.*

cotonniers à diverses doses d’azote, qu’en présence d’une quantité adéquate d’azote résiduel du sol (70 à 125 kg NO₃-N·ha⁻¹), le cotonnier pourrait être cultivé avec de faibles apports en azote (56 à 224 kg N·ha⁻¹) dans la vallée de la Californie aux États-Unis.

De plus, le cotonnier est exigeant en certains éléments tels que l’azote, le phosphore, le potassium, le soufre et le bore que l’on ne trouve pas toujours en quantité suffisante dans le sol, mais qui jouent chacun un rôle spécifique dans la physiologie de la plante (Richard, 1976). En effet, l’azote est un constituant de la molécule de chlorophylle, des protéines et des acides nucléiques (Sawan, 2016), ce qui favorise la photosynthèse, la croissance végétative par la division cellulaire et l’expansion des feuilles, le nombre de

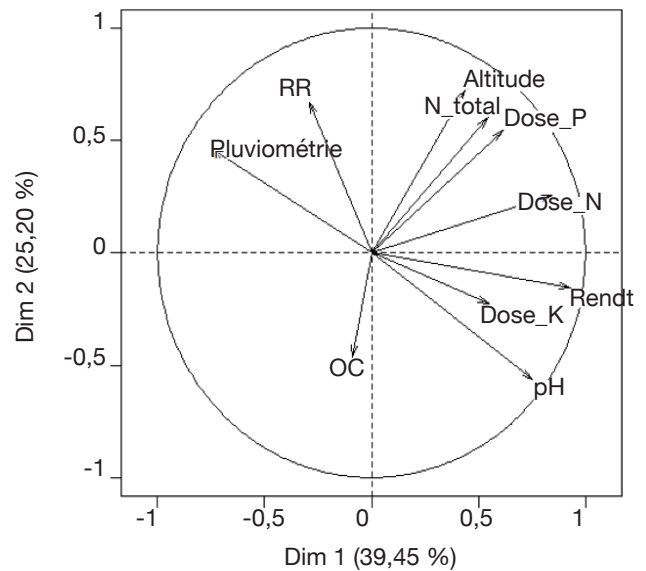


Figure 8. Analyse en composantes principales du ratio de réponse de coton graine (RR), du rendement en coton graine (Rendt), de la pluviométrie annuelle (Pluviométrie), de l’altitude du site d’étude (Altitude), du pH_{eau} du sol (pH), de la dose d’azote (Dose_N), de phosphore (Dose_P), du potassium (Dose_K) et de la teneur en carbone organique du sol (OC) — *Principal Component Analysis of seed cotton response ratio (RR), seed cotton yield (Rendt), annual rainfall (Pluviométrie), study site elevation (Altitude), soil pH (pH_{eau}), Nitrogen rate (Dose_N), Phosphorus (Dose_P), Potassium (Dose_K) and soil organic carbon (OC).*

branches sympodiales et monopodiales et l’amélioration de la productivité grâce à l’augmentation du nombre et du poids de capsules, la longueur et la résistance de la fibre (Singh et al., 2010 ; Baraich et al., 2012 ; Sandeep

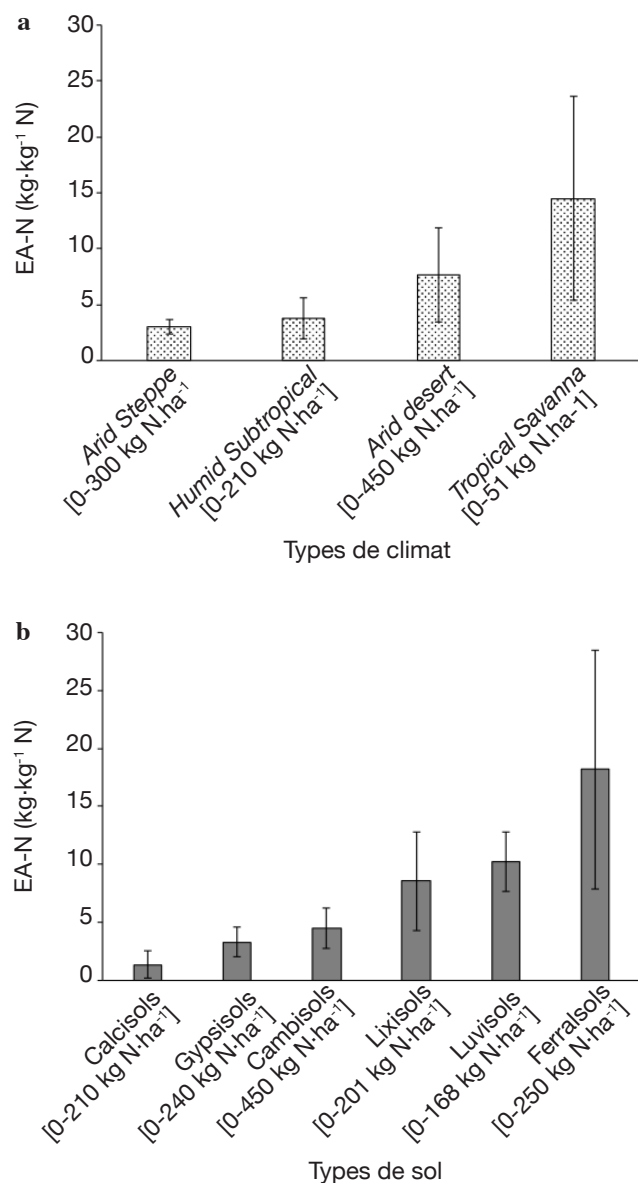


Figure 9. Efficacité agronomique de l’azote (EA-N) sous différents types de climat (a) et de sol (b) sous la combinaison de l’azote, du phosphore et du potassium — *Agronomic efficiency of nitrogen (EA-N) under different climate (a) and soil (b) types under the combination of nitrogen, phosphorus and potassium.*

Les barres d’erreur représentent l’écart-type — *error bars denote the standard deviation* ; les intervalles après les types de sol et de climat représentent la variation de la dose d’azote appliquée en kg.ha⁻¹ — *intervals after soil and climate types represent the variation in applied nitrogen rate in kg.ha⁻¹.*

et al., 2015). Le déficit en azote, surtout pendant la période de fructification du cotonnier, réduit l’activité photosynthétique des feuilles, le transfert des assimilats des feuilles vers les organes fructifères, conduisant à la réduction du nombre de capsules et du rendement

Tableau 11. ANOVA de l’efficacité agronomique de l’azote (AE-N) en fonction de l’altitude, la pluviométrie et la dose d’azote appliquée sous l’application exclusive de l’azote, la combinaison azote-phosphore et la combinaison azote-phosphore-potassium — *ANOVA of agronomic efficiency of nitrogen (AE-N) as affected by altitude, rainfall and applied nitrogen rate under exclusive nitrogen application, nitrogen-phosphorus combination and nitrogen-phosphorus-potassium combination.*

	ddl.	F-value	p-value
Azote			
Ordonnée	37	56,38	<0,000
Classes Altitude	4	0,08	0,796
Classes Pluviométrie	4	0,00	0,991
Classes Dose N	37	3,87	0,029
Type de sol	4	2,60	0,189
Combinaison azote-phosphore			
Ordonnée	61	20,54	<0,000
Classes Altitude	3	11,35	0,043
Classes Pluviométrie	3	0,27	0,640
Classes Dose N	61	2,18	0,122
Combinaison azote-phosphore-potassium			
Ordonnée	149	111,91	<0,000
Classes Altitude	149	0,76	0,384
Classes Pluviométrie	149	14,61	<0,000
Classes Dose N	149	4,78	0,010
Classes Dose P	17	1,22	0,319
Classes Dose K	149	11,32	<0,000
Type de climat	17	3,50	0,038
Type de sol	149	2,13	0,043

Classes de pluviométrie, classes de d’altitude, type de sol, type de climat — *rainfall classes, altitude classes, type of soil, type of climate* : voir **tableaux 4 et 6** — *see tables 4 and 6.*

final (Ayissaa & Kebedeb, 2011). C’est pourquoi la pratique de la fertilisation du cotonnier à base d’azote minéral seul ou en combinaison avec le phosphore ou le potassium, ou avec les deux à la fois, constitue la pratique la plus répandue dans ce bilan de recherche sur la réponse du cotonnier à la fertilisation

L’importance des autres éléments majeurs (P et K) dans la nutrition du cotonnier a été mise en évidence par l’amélioration de la réponse du cotonnier à la combinaison de l’azote, du phosphore et du potassium (**Tableau 2, Figures 2, 3 et 4**). Le phosphore stimule la croissance des racines, favorise la floraison et le développement des fruits, la maturation des capsules et l’accélération de leur ouverture (Carvalho et al., 2011). Quant au potassium, il assure un rôle de régulation du

métabolisme, de la croissance et du développement de la plante (Oosterhuis et al., 2013). La réduction de l'activité photosynthétique et enzymatique liée au faible niveau de potassium a été également rapportée (Pervez et al., 2004). Outre son rôle de régulateur de croissance, il stimule également la floraison chez le cotonnier, la maturation des organes fructifères et améliore la longueur et la résistance de la fibre produite (Girma et al., 2007 ; Pettigrew, 2008 ; Coker et al., 2009).

Tenant compte du rôle de ces éléments, leur disponibilité dans le sol est indispensable pour la formation des organes de reproduction en grand nombre. Ainsi, ces résultats peuvent être attribués à la disponibilité des nutriments nécessaires à la croissance et au développement du cotonnier sur les parcelles fertilisées comparativement aux témoins (Fritschi et al., 2003 ; Janat, 2008 ; Sawan et al., 2008 ; Koulibaly et al., 2015 ; Sandeep et al., 2015). Ces résultats confirment ceux obtenus par Traoré et al. (2007), Koulibaly et al. (2010), Dagbénonbakin et al. (2012). En effet, ces derniers ont montré des augmentations de rendement de près de 50 % dues aux apports d'engrais minéraux au Burkina Faso et au Nord Bénin.

4.2. Effets du bore et du soufre sur la croissance et le rendement du cotonnier

Les résultats ont montré un effet significatif du bore sur le rendement en coton graine. Ceci dénote du rôle non négligeable que joue cet élément dans la croissance, le développement et la productivité du cotonnier. En effet, le bore est universellement reconnu comme l'un des micronutriments les plus importants pour la production de coton. Il contribue au transfert des sucres et de nutriments des feuilles aux fruits. Il joue un rôle essentiel dans la formation des cellules végétales et augmente la pollinisation et le développement des graines (Görmüş, 2005). Les exportations de bore par le cotonnier sont plus élevées comparativement à d'autres cultures. Niaz et al. (2013) ont démontré que les exportations de bore étaient quatre fois supérieures à celles du blé cultivé sur le même site. La croissance et le rendement du coton sont fortement affectés par l'application du bore (Dong, 1995). En effet, la carence en bore entrave la croissance en hauteur et en biomasse sèche des plants de cotonnier en réduisant la translocation des assimilés à travers les faisceaux vasculaires des pétioles, provoquant ainsi un retard de croissance et le développement des organes reproductifs (Rosolem & Costa, 2000 ; Abid et al., 2007). La carence en bore peut également provoquer de petites déformations des feuilles et des capsules, la réduction de la longueur des branches fructifères, la faible rétention des capsules et la réduction des rendements en fibre (Görmüş, 2005). De nombreux auteurs avaient rapporté les effets positifs de l'apport du bore en termes d'amélioration

du rendement des cultures sur des sols à faible teneur en bore (Chakraborti & Barman, 2003 ; Soylu & Topal, 2004 ; Chaudhry et al., 2007). Abid et al. (2007) et Niaz et al. (2013) ont observé une amélioration de la hauteur de la tige principale, du nombre de nœuds, le poids des capsules et le rendement en coton graine suite à l'application complémentaire de différentes doses de bore au NPK au Pakistan. L'application de 2 g·ha⁻¹ de bore au NPK (150N-60P₂O₅-50K₂O) a induit un accroissement de rendement de coton graine comparativement à l'application exclusive de NPK, attribuable à l'amélioration du poids des capsules (Abid et al., 2007). Cependant, ces auteurs ont rapporté que l'application de bore a faiblement affecté la qualité de la fibre produite (la longueur, la finesse et la résistance de la fibre).

Par rapport au soufre, son effet n'est pas significatif. Ce résultat serait dû à la variabilité des conditions édaphique et climatique. Cependant, l'importance du soufre dans l'amélioration de la productivité des cultures a été démontrée par plusieurs auteurs. En effet, le soufre (S), quatrième nutriment après l'azote, le phosphore et le potassium, constitue une composante des protéines, de la chlorophylle, des vitamines et des enzymes et joue un rôle crucial dans la croissance et la productivité des cultures (Yu et al., 2019). Il affecte la croissance, le développement et le rendement du cotonnier. En effet, il entre dans la composition de la cystéine, un acide aminé des protéines et catalyse certains systèmes enzymatiques (Najafian & Zahedifar, 2015). Il représente également un constituant des enzymes impliqués dans le métabolisme comme les réductases des nitrates et des nitrites (Swamy et al., 2005). L'apport du soufre a significativement amélioré le rendement en coton graine ou en coton fibre (Mullins, 1998 ; Makhdum et al., 2001 ; Geng et al., 2016). En effet, Geng et al. (2016) ont rapporté une amélioration de rendement de coton fibre de 3,77 à 9,26 % par rapport au témoin suite à l'application de 60 et 120 kg·ha⁻¹ de soufre sur un sol limono-argileux en Chine. Un effet significatif de la fertilisation à base du soufre sur le rendement en coton graine, le nombre de capsules par plant et le poids des capsules a été observé au Pakistan (Makhdum et al., 2001). Une amélioration de rendement en coton fibre de 21 % a été observée suite à l'application de 22 kg·ha⁻¹ de soufre sur un sol sablo-argileux en Alabama (Mullins, 1998).

4.3. Effets des types de sol et de climat sur la réponse du cotonnier et l'efficacité agronomique de l'azote

La réponse du cotonnier à la fertilisation minérale a été peu sensible à la diversité des types de sol, contrairement à l'efficacité agronomique de l'azote. Cependant, il a été fréquemment rapporté que les types de sol, de par

leurs caractéristiques telles que la texture, la capacité d'échange cationique et la teneur initiale en azote, affectent significativement la réponse des cultures. À ce propos, Kalivas & Kollias (2001) ont observé des différences significatives de rendement en coton graine cultivé sur des Vertisols, Inceptisols et Alfisols en Grèce. La différence de niveau de productivité de ces types de sol a été attribuée à leur texture et à la teneur en carbonate dans la couche supérieure. De même, Sileshi et al. (2008), dans une méta-analyse effectuée sur la réponse du maïs sous différentes pratiques de culture des ligneux et légumineuses herbacées en Afrique subsaharienne, avaient trouvé des différences significatives de réponse entre les types de sol rencontrés. Il ressort de leur étude que les Lixisols étaient plus productifs que les Ferralsols et les Nitisols. Cependant, la tendance n'était pas claire sous les légumineuses récoltées ou non récoltées et les engrais verts. Dans la présente étude, les Ferralsols ou les sols ferrallitiques ont montré une meilleure efficacité agronomique selon la hiérarchie suivante : Luvisols > Lixisols > Cambisols > Gypsisols > Calcisols avec l'application combinée azote-phosphore-potassium (**Tableau 11**).

Les résultats de la présente étude ont montré que les rendements en coton graine étaient élevés dans les zones à faible pluviométrie (**Figure 8**). En effet, lorsque les pluies sont bien réparties, les besoins en eau du cotonnier durant le cycle cultural varient de 500 à 800 mm (Devèze, 2008 ; Ouédraogo et al., 2008). Bien que le déficit en eau réduise le développement des feuilles, le nombre de sites fructifères, de bourgeons floraux, de capsules et le rendement final du cotonnier (Pettigrew, 2004 ; Zonta et al., 2016), la réduction des rendements en coton graine due aux conditions humides de six à huit semaines pendant la floraison et la maturité des capsules a été également rapportée (Baigorria et al., 2008). Selon Cetin & Basbag (2010), la persistance des pluies pendant la floraison et l'ouverture des capsules entraîne la réduction de la pollinisation et la qualité de la fibre de coton d'une part, la chute des boutons floraux et des capsules, d'autre part.

4.4. Effets de la dose d'azote appliquée sur l'efficacité agronomique de l'azote

Les résultats ont montré une réduction significative de l'efficacité agronomique de l'azote (AE-N) avec l'augmentation des doses d'azote appliquées. En effet, les fortes doses de fertilisants ne sont pas valorisées par le cotonnier, et cela est dû à plusieurs facteurs comme le niveau initial de l'azote résiduel du sol (Rochester et al., 2001 ; Devkota et al., 2013), les pertes par lixiviation au-delà du système racinaire des plantes (Nyamangara et al., 2003) ou par volatilisation

(Lin et al., 2007), surtout dans les zones tropicales caractérisées par une forte chaleur. Devkota et al. (2013) ont montré que la teneur en azote résiduel du sol était responsable de la réduction de AE-N avec l'augmentation des doses d'azote appliquées. De plus, les fortes teneurs en azote initial du sol réduisent l'effet de la fertilisation sur le cotonnier (Rochester et al., 2001). Cela entraîne le plus souvent une consommation de luxe caractérisée par un important développement végétatif au détriment des organes de reproduction. Ainsi, tout apport de fertilisant devrait tenir compte du niveau initial de nutriments dans le sol afin d'améliorer la productivité des cultures (Devkota et al., 2013). La réduction des doses d'azote appliquées a été également recommandée pour l'amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'azote et les effets bénéfiques sur le plan économique et environnemental (Yu et al., 2007).

5. CONCLUSIONS

Cette revue avait pour objectif de faire une synthèse quantitative de la réponse du cotonnier à la fertilisation et d'en ressortir les facteurs déterminants. Les résultats indiquent une réponse positive du cotonnier aux différentes pratiques de fertilisation recensées. La combinaison de l'azote, du phosphore et du potassium a enregistré les meilleurs ratios de réponse et de l'efficacité agronomique de l'azote comparativement à l'application exclusive de l'azote ou sa combinaison avec le phosphore ou le potassium. Seules les doses de nutriments appliqués ont significativement affecté la réponse du cotonnier à la fertilisation minérale. La tendance n'a pas été clairement établie entre les différents types de sol et de climat pour la différence de rendement et le ratio de réponse, contrairement à l'efficacité agronomique de l'azote. Le climat de type *Tropical Savanna* et le sol de type Ferralsol ont montré les meilleures différences de rendement en coton graine et efficacités agronomiques de l'azote au niveau de l'application combinée de l'azote, du phosphore et du potassium.

Cette étude recommande donc l'application combinée des éléments majeurs (N, P, K) dans des proportions équilibrées à des doses modérées, afin d'améliorer l'efficacité d'utilisation des nutriments en culture cotonnière.

Abréviations

AE-N : Efficacité agronomique de l'azote

CV : Coefficient de variation

D : Différence de rendement d'un traitement par rapport au témoin de l'essai

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture

K₂O : Oxyde de Potassium
 OGM : Organismes Génétiquement Modifiés
 P : Pluviométrie
 P₂O₅ : Pentoxyde de Phosphore
 RR : Ratio de Réponse

Remerciements

Les auteurs témoignent leur profonde gratitude à tous les auteurs dont les articles ont été exploités pour la réalisation de cette revue quantitative.

Bibliographie

- Abid M., Niaz A., Asghar A. & Chaudry M.A., 2007. Influence of soil-applied boron on yield, fiber quality and leaf boron contents of cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *J. Agric. Social Sci.*, **3**, 7-10.
- Adeli A. & Varco J.J., 2006. Potassium management effects on cotton yield, nutrition, and soil potassium level. *J. Plant Nutr.*, **25**(10), 2229-2242, doi.org/10.1081/PLN-120014072
- Ahmed N. et al., 2013. Boron requirement of irrigated cotton in a typic haplocambid for optimum productivity and seed composition. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, **44**(8), 1293-1309, doi.org/10.1080/00103624.2012.756508
- Akhtar M.E. et al., 2003. Effect of potash application on seed cotton yield and yield components on selected cotton varieties-I. *Asian J. Plant Sci.*, **2**(8), 602-604.
- Ali L., Ali M. & Mohyuddin Q., 2011. Effect of foliar application of zinc and boron on seed cotton yield and economics in cotton-wheat cropping pattern. *J. Agric. Res.*, **49**, 173-180.
- Ali S. et al., 2018. Potassium relative ratio to nitrogen considerably favors carbon metabolism in late-planted cotton at high planting density. *Field Crops Res.*, **223**, 48-56, doi.org/10.1016/j.fcr.2018.04.005.
- Alubaidi M.O., Al-Naqeeb M.A. & Saleh H.K., 2016. Response of cotton to nitrogen fertilizer and spacing between holes. *Iraqi J. Agric. Sci.*, **47**(6), 1562-1567, doi.org/10.36103/ijas.v47i6.487
- Amidou M., Djèntonin A.J. & Wennink B., 2005. Valorisation des résidus de récolte dans l'exploitation agricole au nord du Bénin : utilisation du fumier produit dans le parc de stabulation des bœufs. *Bull. Rech. Agron. Bénin*, **47**, 19-25.
- Anjum M.A. et al., 2007. Response of cotton to plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) inoculation under different levels of nitrogen. *J. Agric. Res. (Pakistan)*, **45**(2), 135-143.
- Aslam M., Sangh A.H., Khalid L. & Javed S., 2013. Effect of different levels of nitrogen and plant population on growth and yield of cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Asian J. Agric. Biol.*, **1**(3), 127-132.
- Ayissaa T. & Kebedeb F., 2011. Effect of nitrogenous fertilizer on the growth and yield of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) varieties in middle Awash, Ethiopia. *J. Drylands*, **4**, 248-258.
- Baigoria G.A. et al., 2008. Assessing predictability of cotton yields in the southeastern United States based on regional atmospheric circulation and surface temperatures. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, **47**(1), 76-91, doi.org/10.1175/2007JAMC1523.1
- Baraich A.A.K., Baraich A.H.K., Jamali L.A. & Salarzi A.U., 2012. Effect of nitrogen application rates on growth and yield of cotton varieties. *Pak. J. Agric. Eng. Vet. Sci.*, **28**(2), 115-123.
- Barton M.J., Hanson R.G., Simms P.M. & Smith J.K., 1982. Sulphurfertilizereffecton cotton: II. Growth characteristics, nutrient status and yield. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, **13**(10), 835-850, doi.org/10.1080/00103628209367314
- Bationo A. & Buerkert A., 2001. Soil organic carbon management for sustainable land use in Sudano-Sahelian West Africa. In: Martius C., Tiessen H. & Vlek P.L.G., eds. *Managing organic matter in tropical soils: scope and limitations*. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 131-142, doi.org/10.1007/978-94-017-2172-1_13
- Bayala J. et al., 2012. Cereal yield response to conservation agriculture practices in drylands of West Africa: a quantitative synthesis. *J. Arid Environ.*, **78**, 13-25, doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.10.011
- Bi J.L. et al., 2001. Effect of cotton nitrogen fertilization on *Bemisia argentifolii* populations and honeydew production. *Entomol. Exp. Appl.*, **99**(1), 25-36, doi.org/10.1046/j.1570-7458.2001.00798.x
- Bibi Z. et al., 2011. Response of *Gossypium hirsutum* genotypes to various nitrogen levels. *Pak. J. Bot.*, **43**(5), 2403-2409.
- Boquet D.J. & Breitenbeck G.A., 2000. Nitrogen rate effect on partitioning of nitrogen and dry matter by cotton. *Crop Sci.*, **40**(6), 1685-1693, doi.org/10.2135/cropsci2000.4061685x
- Boquet D.J. et al., 2009. Cotton yield responses to fertilizer nitrogen rates in a cotton-corn rotation. *Agron. J.*, **101**(2), 400, doi.org/10.2134/agronj2008.0134
- Bronson K.F. et al., 2017. Improving nitrogen fertilizer use efficiency in surface - and overhead sprinkler - irrigated cotton in the desert Southwest. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **81**(6), 1401-1412.
- Buerkert A. et al., 2001. Variation in grain quality of pearl millet from Sahelian West Africa. *Field Crops Res.*, **69**(1), 1-11, doi.org/10.1016/S0378-4290(00)00127-1
- Buriro M. et al., 2016. Effect of foliar applied boron, zinc and urea on growth and yield of cotton. *Sci. Int. Lahore*, **28**(4), 4113-4117.
- Carrillo-Reche J., Vallejo-Marín M. & Quilliam R.S., 2018. Quantifying the potential of 'on-farm' seed priming to increase crop performance in developing countries. A meta-analysis. *Agron. Sustainable Dev.*, **38**(6), 64-77, doi.org/10.1007/s13593-018-0536-0

- Carvalho M.C.S., Ferreira G.B. & Staut L.A., 2011. Nutrição, calagem e adubação do algodoeiro. In: Freire E.C. *Algodão no cerrado do Brasil*. Brasília: Abrapa, 677-752.
- Cassman K.G. et al., 1990. Potassium nutrition effects on lint yield and fiber quality of Acala cotton. *Crop Sci.*, **30**(3), 672-677, doi.org/10.2135/cropsci1990.0011183x003000030039x
- Cetin O. & Basbag S., 2010. Effects of climatic factors on cotton production in semi-arid regions-A review. *Res. Crops*, **11**(3), 785-791.
- Chakraborti S.K. & Barman P., 2003. Enhancement of yield of wheat genotypes by application of borax in Terai region. *J. Interacademia*, **7**, 256-261.
- Chaudhry A.U. & Sarwar M., 1998. Optimization of nitrogen fertilization in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Pak. J. Biol. Sci.*, **2**, 242-243, doi.org/10.3923/pjbs.1999.242.243
- Chaudhry E.H., Timmer V., Javed A.S. & Siddique T.M., 2007. Wheat response to micronutrients in rain-fed areas of Punjab. *Soil Environ.*, **26**, 97-101.
- Chen W. et al., 2010. Effects of salinity and nitrogen on cotton growth in arid environment. *Plant Soil*, **326**(1-2), 61-73, doi.org/10.1007/s11104-008-9881-0
- Clawson E.L. et al., 2006. Nitrogen fertilization and yield of cotton in ultra-narrow and conventional row spacings. *Agron. J.*, **98**(1), 72-79, doi.org/10.2134/agronj2005.0033
- Clement-Bailey J. & Gwathmey C.O., 2007. Potassium effects on partitioning, yield, and earliness of contrasting cotton cultivars. *Agron. J.*, **99**, 1130-1136, doi.org/10.2134/agronj2006.0288
- Coker D.L., Oosterhuis D.M. & Brown R.S., 2009. Cotton yield response to soil-and foliar-applied potassium as influenced by irrigation. *J. Cotton Sci.*, **13**(1), 1-10.
- Dagbénonbakin G.D. et al., 2012. Effets agronomiques du compost et du $N_{14}P_{23}K_{14}S_5B_1$ sur la production et les caractéristiques du rendement de coton-graine au Nord Bénin. *Bull. Rech. Agron. Bénin* (BRAB), **numéro spécial Coton**, 36-45.
- Devèze J.C., 2008. *Défis agricoles africains*. Paris : Karthala, 154-155.
- Devkota M. et al., 2013. Tillage and nitrogen fertilization effects on yield and nitrogen use efficiency of irrigated cotton. *Soil Tillage Res.*, **134**, 72-82, doi.org/10.1016/j.still.2013.07.009
- Dong J.F., 1995. The yield increasing ability of spraying cotton with boron. *J. Henan Agric. Sci.*, **3**, 6.
- Dong H. et al., 2010. Effects of plant density and nitrogen and potassium fertilization on cotton yield and uptake of major nutrients in two fields with varying fertility. *Field Crops Res.*, **119**(1), 106-113, doi.org/10.1016/j.fcr.2010.06.019
- Ferrari S. et al., 2015. Effects on soil chemical attributes and cotton yield from ammonium sulfate and cover crops. *Acta Sci. Agron.*, **37**(1), 75-83, doi.org/10.4025/actasciagron.v37i1.17972
- Fritschi F.B. et al., 2003. Response of irrigated acala and pima cotton to nitrogen fertilization. *Agron. J.*, **95**(1), 133-146, doi.org/10.2134/agronj2003.1330a
- Gandahi A.W. et al., 2016. Amelioration of cotton leaf reddening with boron and zinc application through balanced nutrient management practices. *Sarhad J. Agric.*, **32**(4), 275-281, doi.org/10.17582/journal.sja/2016/32.4.275.281
- Gangaiah B., Ahlawat I.P.S. & Babu M.B.B.P., 2014. Response of nitrogen fertilization on bt and non-bt cotton (*Gossypium hirsutum*) hybrids. *SAARC J. Agric.*, **11**(1), 121-132, doi.org/10.3329/sja.v11i1.18389
- Geisseler D. & Scow K.M., 2014. Long-term effects of mineral fertilizers on soil microorganisms – A review. *Soil Biol. Biochem.*, **75**, 54-63, doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.03.023
- Geng J. et al., 2016. Effects of polymer coated urea and sulfur fertilization on yield, nitrogen use efficiency and leaf senescence of cotton. *Field Crops Res.*, **187**, 87-95, doi.org/10.1016/j.fcr.2015.12.010
- Girma K. et al., 2007. Cotton lint yield and quality as affected by applications of N, P, and K fertilizers. *J. Cotton Sci.*, **11**(1), 12-19.
- Gobi R. & Vaiyapuri V., 2012. Effect of sulphur and micronutrients (zinc and boron) on growth, yield attributes and quality of cotton. *Int. J. Curr. Res.*, **4**(11), 357-359.
- Görmüş Ö., 2002. Effects of rate and time of potassium application on cotton yield and quality in Turkey. *J. Agron. Crop Sci.*, **188**(6), 382-388, doi.org/10.1046/j.1439-037x.2002.00583.x
- Görmüş Ö., 2005. Interactive effect of nitrogen and boron on cotton yield and fiber quality. *Turkish J. Agric. For.*, **29**(1), 51-59.
- Görmüş Ö., 2014. Cotton yield response to sulfur as influenced by source and rate in the Çukurova Region, Turkey. *SDU J. Fac. Agric./SDÜ Ziraat Fakültesi Dergisi*, **9**(1), 68-76.
- Guiro A.T., 2005. *Bilan de la recherche agricole et agroalimentaire au Sénégal*. Technical report. ISRA, ITA, CIRAD.
- Howard D.D. et al., 2001. Nitrogen fertilization of no-till cotton on loess-derived soils. *Agron. J.*, **93**(1), 157-163, doi.org/10.2134/agronj2001.931157x
- Hutmacher R.B. et al., 2004. Response of recent acala cotton varieties to variable nitrogen rates in the San Joaquin Valley of California. *Agron. J.*, **96**(1), 48-62, doi.org/10.2134/agronj2004.4800
- IUSS Working Group WRB, 2015. *Base de référence mondiale pour les ressources en sols 2014, mise à jour 2015. Système international de classification des sols pour nommer les sols et élaborer des légendes de cartes pédologiques. Rapport sur les ressources en sols du monde n°106*. Rome : FAO.
- Janat M., 2008. Response of cotton to irrigation methods and nitrogen fertilization: yield components, water -

- use efficiency, nitrogen uptake, and recovery. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, **39**(15-16), 2282-2302, doi.org/10.1080/00103620802292293
- Kalivas D. & Kollias V., 2001. Effects of soil, climate and cultivation techniques on cotton yield in Central Greece, using different statistical methods. *Agronomie*, **21**(1), 73-89, doi.org/10.1051/agro:2001110
- Khalifa K., Al-Chammaa M. & Al-Ain F., 2012. Effect of potassium fertilizers on cotton yield and nitrogen uptake efficiency in an arid soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, **43**(16), 2180-2189, doi.org/10.1080/00103624.2012.639427
- Khaliq A., Abbasi M. & Hussain T., 2006. Effects of integrated use of organic and inorganic nutrient sources with effective microorganisms (EM) on seed cotton yield in Pakistan. *Bioresour. Technol.*, **97**(8), 967-972, doi.org/10.1016/j.biortech.2005.05.002
- Khan M.B. & Dar J.S., 2006. Response of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) cultivars to different levels of nitrogen. *J. Res. Sci.*, **17**(4), 257-261.
- Kintché K. et al., 2015. Long-term mineral fertiliser use and maize residue incorporation do not compensate for carbon and nutrient losses from a Ferralsol under continuous maize-cotton cropping. *Field Crops Res.*, **184**, 192-200, doi.org/10.1016/j.fcr.2015.04.019
- Kottek M. et al., 2006. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. Z.*, **15**(3), 259-263, doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130
- Koulibaly B. et al., 2010. Effets de la gestion des résidus de récolte sur les rendements et les bilans culturaux d'une rotation cotonnier-maïs-sorgho au Burkina Faso. *Tropicultura*, **28**(3), 184-189.
- Koulibaly B. et al., 2015. Effets de l'association du compost et de la fumure minérale sur la productivité d'un système de culture à base de cotonnier et de maïs au Burkina Faso. *Tropicultura*, **33**(2), 125-134.
- Koulibaly et al., 2016. Effects of potassium fertilization of lxisols on mineral nutrition and productivity of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) in Burkina Faso. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **10**(2), 722-736.
- Kumar S., Kumar D., Sekhon K.S. & Choudhary O.P., 2018. Influence of levels and methods of boron application on the yield and uptake of boron by cotton in a calcareous soil of Punjab. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, **49**(4), 499-514, doi.org/10.1080/00103624.2018.1431268
- Lin D.-X. et al., 2007. Ammonia volatilization and nitrogen utilization efficiency in response to urea application in rice fields of the Taihu Lake Region, China. *Pedosphere*, **17**(5), 639-645, doi.org/10.1016/S1002-0160(07)60076-9
- Luo Z. et al., 2018. Effects of reduced nitrogen rate on cotton yield and nitrogen use efficiency as mediated by application mode or plant density. *Field Crops Res.*, **218**, 150-157, doi.org/10.1016/j.fcr.2018.01.003
- Mahmood-ul-Hassan et al., 2003. Cotton response to split application of nitrogen fertilizer. *Asian J. Plant Sci.*, **2**, 457-460, doi.org/10.3923/ajps.2003.457.460
- Main C.L. et al., 2013. Effects of nitrogen and planting seed size on cotton growth, development, and yield. *Agron. J.*, **105**(6), 1853-1859, doi.org/10.2134/agronj2013.0154
- Makhdum M.I., Malik M.N.A., Chaudhry F.I. & Din Shabab-Ud, 2001. Effects of gypsum as a sulfur fertilizer in cotton (*G. hirsutum* L.) production. *Int. J. Agric. Biol.*, **3**, 375-377.
- Makhdum M.I. & Malik M.N.A., 2004. Response of a cotton cultivar to sulphur fertilization. *Pak. J. Sci. Ind. Res.*, **47**(2), 126-129.
- Matthews G.A., 1972. Effects of nitrogen, sulphur, phosphorus and boron on cotton in Malawi. *Exp. Agric.*, **8**(3), 219-224, doi.org/10.1017/s0014479700005287
- McConnell J.S. & Mozaffari M., 2005. Yield, petiole nitrate, and node development responses of cotton to early season nitrogen fertilization. *J. Plant Nutr.*, **27**(7), 1183-1197.
- Mubarak I. & Janat M., 2018. Response of new cotton variety (rassafa) to nitrogen fertilizer and partial rootzone drying drip irrigation. *Open Agric. J.*, **12**(1), 1-10, doi.org/10.2174/1874331501812010001
- Mullins G.L., 1998. Cotton response to the rate and source of sulfur on a sandy coastal plain soil. *J. Prod. Agric.*, **11**, 214-218.
- Munir M.K., Tahir M. & Saleem M.F., 2015. Growth, yield and earliness response of cotton to row spacing and nitrogen management. *J. Anim. Plant Sci.*, **25**(3), 729-738.
- Nadeem M.A. et al., 2010. Effect of nitrogen levels and plant spacing on growth and yield of cotton. *Pak. J. Life Soc. Sci.*, **8**(2), 121-124.
- Najafian S. & Zahedifar M., 2015. Antioxidant activity and essential oil composition of *Satureja hortensis* L. as influenced by sulfur fertilizer. *J. Sci. Food Agric.*, **95**(12), 2404-2408.
- Niaz A., Ahmad W., Zia M.H. & Malhi S.S., 2013. Relationship of soil extractable and fertilizer boron to some soil properties, crop yields, and total boron in cotton and wheat plants on selected soils of Punjab, Pakistan. *J. Plant Nutr.*, **36**(3), 343-356, doi.org/10.1080/01904167.2012.744037
- Nyamangara J., Bergström L.F., Piha M.I. & Giller K.E., 2003. Fertilizer use efficiency and nitrate leaching in a tropical sandy soil. *J. Environ. Qual.*, **32**(2), 599-606, doi.org/10.2134/jeq2003.5990
- Olina-Bassala J.-P., M'Biandoun M., Ekorong J.A. & Asfom P., 2008. Évolution de la fertilité des sols dans un système cotonnier-céréales au Nord Cameroun : diagnostic et perspectives. *Tropicultura*, **26**(4), 240-245.
- Oosterhuis D.M., Loka D.A. & Raper T.B., 2013. Potassium and stress alleviation: physiological functions and management of cotton. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, **176**(3), 331-343, doi.org/10.1002/jpln.201200414
- Ouédraogo A. et al., 2008. *Guide de production du coton biologique et équitable*. Ouagadougou : Helvetas.

- Parmar K.B., Hadiya T.M., Babariya N.B. & Polara K.B., 2009. Effect of potassium and sulphur on yield of cotton. *Asian J. Soil Sci.*, **4**(2), 172-174.
- Pervez H., Ashraf M. & Makhdam M.I., 2004. Influence of potassium nutrition on gas exchange characteristics and water relations in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Photosynthetica*, **42**(2), 251-255, doi.org/10.1023/B:PHOT.0000040597.62743.5b
- Pettigrew W.T., 2004. Moisture deficit effects on cotton lint yield, yield components, and boll distribution. *Agron. J.*, **96**(2), 377, doi.org/10.2134/agronj2004.3770
- Pettigrew W.T., 2008. Potassium influences on yield and quality production for maize, wheat, soybean and cotton. *Physiologia plantarum*, **133**(4), 670-681, doi.org/10.1111/j.1399-3054.2008.01073.x
- Pettigrew W.T. & Meredith W.R., 1997. Dry matter production, nutrient uptake, and growth of cotton as affected by potassium fertilization. *J. Plant Nutr.*, **20**(4-5), 531-548, doi.org/10.1080/01904169709365272
- Pettigrew W.T. et al., 2005. Potassium fertilization effects on cotton lint yield, yield components, and reniform nematode populations. *Agron. J.*, **97**(4), 1245-1251, doi.org/10.2134/agronj2004.0321
- Pouya M.B. et al., 2013. Perception paysanne et impact agro-pédologique du niveau de mécanisation agricole dans les zones cotonnières Centre et Ouest du Burkina Faso. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **7**(2), 489-506, doi.org/10.4314/ijbcs.v7i2.7
- Prasad M. & Prasad R., 1996. Response of various levels of nitrogen, zinc and magnesium on seed cotton yield. *Indian J. Plant Physiol.*, **1**, 286-287.
- Reiter M.S., Reeves D.W. & Burmester C.H., 2008. Cotton nitrogen management in a high-residue conservation system: source, rate, method, and timing. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **72**(5), 1330, doi.org/10.2136/sssaj2007.0314
- Reddy et al., 2007. Cotton growth and yield response to nitrogen applied through fresh and composted poultry litter. *J. Cotton Sci.*, **11**, 26-34.
- Richard L., 1976. Diagnostic pétiolaire de la nutrition azotée du cotonnier. *Coton Fibres Trop.*, **31**, 429-437.
- Rochester I.J. et al., 2001. Using legumes to enhance nitrogen fertility and improve soil condition in cotton cropping systems. *Field Crops Res.*, **70**(1), 27-41, doi.org/10.1016/S0378-4290(00)00151-9
- Rosolem C.A. & Costa A., 2000. Cotton growth and boron distribution in the plant as affected by a temporary deficiency of boron. *J. Plant Nutr.*, **23**(6), 815-825, doi.org/10.1080/01904160009382062
- Saleem M.F. & Bilal M.F., 2010. Effect of nitrogen on seed cotton yield and fiber qualities of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) cultivars. *J. Anim. Plant Sci.*, **20**, 23-27.
- Sandeep R., Mehta A.K., Thakral S.K. & Mahesh K., 2015. Effect of nitrogen and phosphorus levels on growth, yield attributes and yield of Bt cotton. *J. Cotton Res. Dev.*, **29**(1), 76-78.
- Sawan Z.M., 2016. Cottonseed yield and its quality as affected by mineral nutrients and plant growth retardants. *Cogent Biol.*, **2**(1), 1245938, doi.org/10.1080/23312025.2016.1245938.
- Sawan Z.M., Mahmoud M.H. & El-Guibali A.H., 2008. Influence of potassium fertilization and foliar application of zinc and P on growth, yield and fiber properties of Egyptian cotton (*Gossypium barbadense* L.). *J. Plant Ecol.*, **1**, 259-270, doi.org/10.1093/jpe/rtn021
- Seilsepour M. & Rashidi M., 2011. Effect of different application rates of nitrogen on yield and quality of cotton (*Gossypium hirsutum*). *Am.-Eurasian J. Agric. Environ. Sci.*, **10**(3), 366-370.
- Sileshi G., Akinnifesi F.K., Ajayi O.C. & Place F., 2008. Meta-analysis of maize yield response to woody and herbaceous legumes in sub-Saharan Africa. *Plant Soil*, **307**(1-2), 1-19, doi.org/10.1007/s11104-008-9547-y
- Singh Y., Rao S.S. & Regar P.L., 2010. Deficit irrigation and nitrogen effects on seed cotton yield, water productivity and yield response factor in shallow soils of semi-arid environment. *Agric. Water Manage.*, **97**(7), 965-970, doi.org/10.1016/j.agwat.2010.01.028
- Soomro A.W. et al., 2000. Response of cotton to various doses of npk fertilizers. *Pak. J. Biol. Sci.*, **3**(9), 1436-1437, doi.org/10.3923/pjbs.2000.1436.1437
- Soylu S. & Topal A., 2004. Yield and yield attributes of durum wheat genotypes as affected by boron application in boron-deficient calcareous soils: an evaluation of major Turkish genotypes for boron efficiency. *J. Plant Nutr.*, **27**, 1077-1106, doi.org/10.1081/PLN-120037537
- Swamy U. et al., 2005. Structure of spinach nitrite reductase: implications for multi-electron reactions by the iron-sulfur: siroheme cofactor. *Biochemistry*, **44**(49), 16054-16063, doi.org/10.1021/bi050981y
- Traoré O., Koulibaly B. & Dakuo D., 2007. Effets comparés de deux formes d'engrais sur les rendements et la nutrition minérale en zone cotonnière au Burkina Faso. *Tropicicultura*, **25**(4), 200-203.
- Tsialtas I.T., Shabala S., Baxevanos D. & Matsi T., 2016. Effect of potassium fertilization on leaf physiology, fiber yield and quality in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) under irrigated Mediterranean conditions. *Field Crops Res.*, **193**, 94-103, doi.org/10.1016/j.fcr.2016.03.010
- Vanlauwe B. et al., 2011. Agronomic use efficiency of N fertilizer in maize-based systems in sub-Saharan Africa within the context of integrated soil fertility management. *Plant Soil*, **339**(1), 35-50, doi.org/10.1007/s11104-010-0462-7
- Yin X. & Main C., 2015. Nitrogen fertilization and critical nitrogen concentration for contemporary high yielding cotton under no-tillage. *Nutr. Cycling Agroecosyst.*, **103**(3), 359-373, doi.org/10.1007/s10705-015-9751-0
- Yu J., Yin X., Raper T.B. & Jagadamma S., 2019. Sulfur fertilization and sulfur sufficiency range for contemporary cotton cultivars with high yielding potentials. *Int. J. Plant Prod.*, **13**(4), 369-378, doi.org/10.1007/s42106-019-00061-9

Yu Q. et al., 2007. Evaluation of nitrification inhibitor 3,4-dimethyl pyrazole phosphate on nitrogen leaching in undisturbed soil columns. *Chemosphere*, **67**(5), 872-878, doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.11.016

factor in semi-arid environment. *Austr. J. Crop Sci.*, **10**(1), 118-126.

Zonta J.H. et al., 2016. Irrigation and nitrogen effects on seed cotton yield, water productivity and yield response

(113 réf.)